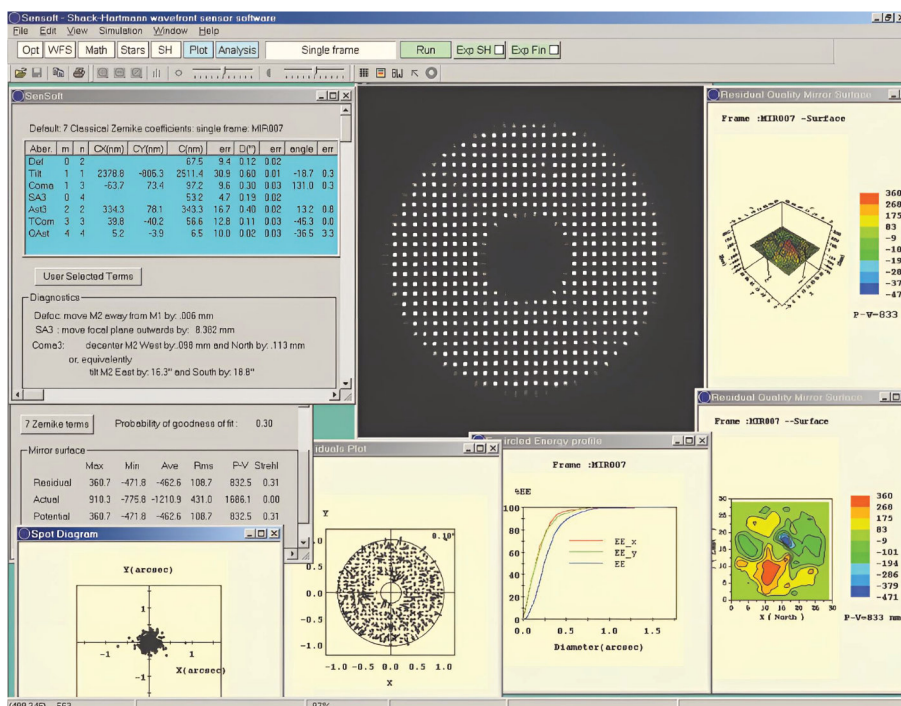
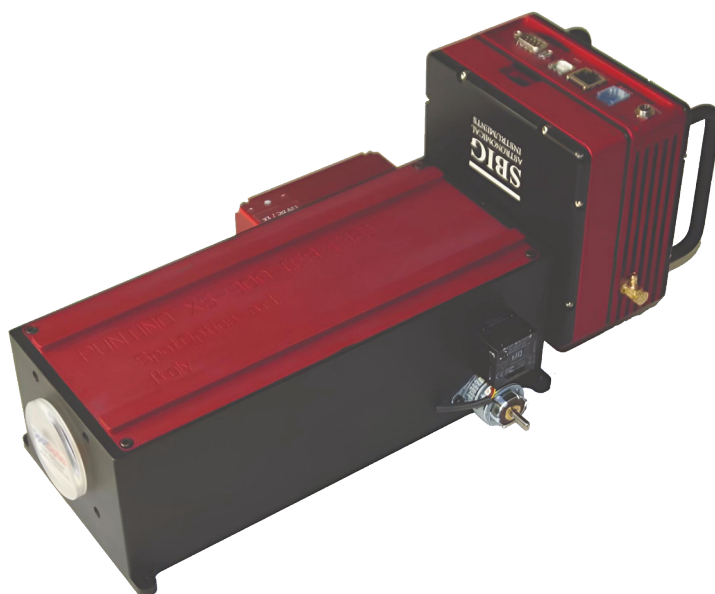


SPOTOPTICS

THE SOFTWARE PEOPLE FOR OPTICS

PUNTINO

望遠鏡を最適化するシャックハルトマン波面センサー



目次

1. パワフルなツール群で望遠鏡性能を最適化.....	3
2. 望遠鏡のファインチューニングにより1等星までゲインアップ.....	3
3. Puntino-Pro: プロフェッショナル天文台用.....	5
4. ミニセンサー.....	6
5. Puntino OMI.....	6
6. 特長:概要.....	7
7. ツール一式.....	7
8. アクティブ光学系: 副鏡の移動によるコマとデフォーカスの補正.....	8
9. シミュレーション.....	8
10. Sensoft:ゼルニケ係数等.....	9
11. PuntinoProの取り付け.....	10
12. SHテストの頻度.....	10
13. 校正の頻度.....	10
14. Sensoft:機器の制御と分析.....	11
15. PuntinoProの機能概要.....	12
16. MIMMsoft: 測定値を見るためのソフトウェア.....	13
17. Alisa: マイクロアライメント用ソフトウェア.....	14
18. 技術仕様.....	15
19. 機能の詳細 PuntinoProとSensoft.....	16
20. PuntinoProとSensoftのオプション機能.....	18
21. 波面: その測定.....	18
22. 例.....	19
22.1. 望遠鏡のアライメント.....	19
22.2. 非点収差と三角コマ.....	20
22.3. サポートエラー.....	21
23. 温度の影響.....	22
24. ドームと鏡が見える状態での測定.....	23
25. Sensoftからの出力.....	24
26. 完璧な画像と収差による劣化.....	25
26.1. コリメーション誤差によるコマ.....	26
26.2. 通常の望遠鏡におけるこれらの収差はどの程度重要か? コマの程度.....	27
26.3. 球面収差.....	28
26.4. コマの大きさ.....	29
26.5. 環状ゼルニケ多項式の7つのゼルニケ項の式.....	30
27. 会社について.....	31

1. パワフルなツールで望遠鏡の性能を最適化

深みのある高品質な天文画像を得るためには、きめ細かく調整された望遠鏡が鍵となります。

望遠鏡用に特別に開発されたシャックハルトマン波面センサーPuntinoは、世界中の天文台で使用された豊富な経験に基づいています。

光学系、メカニクス、ミラーサポート、ミラー、ドームシーイングの完全な分析を行います。分析結果に基づいて、ソフトウェアが講ずべき是正措置を提案するため、メンテナンス作業が非常に簡素化され、通常であれば時間がかかる作業も数時間で完了します。

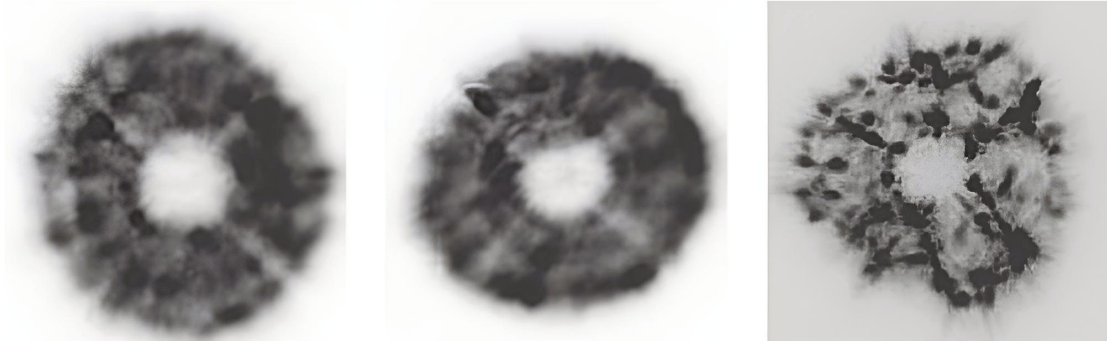
フルセットのツールを提供するという当社の哲学に基づき、アライメント望遠鏡やオートコリメーター用のCCDベースのシステムも提供しています。

2. 望遠鏡の微調整で1等星までゲインアップ

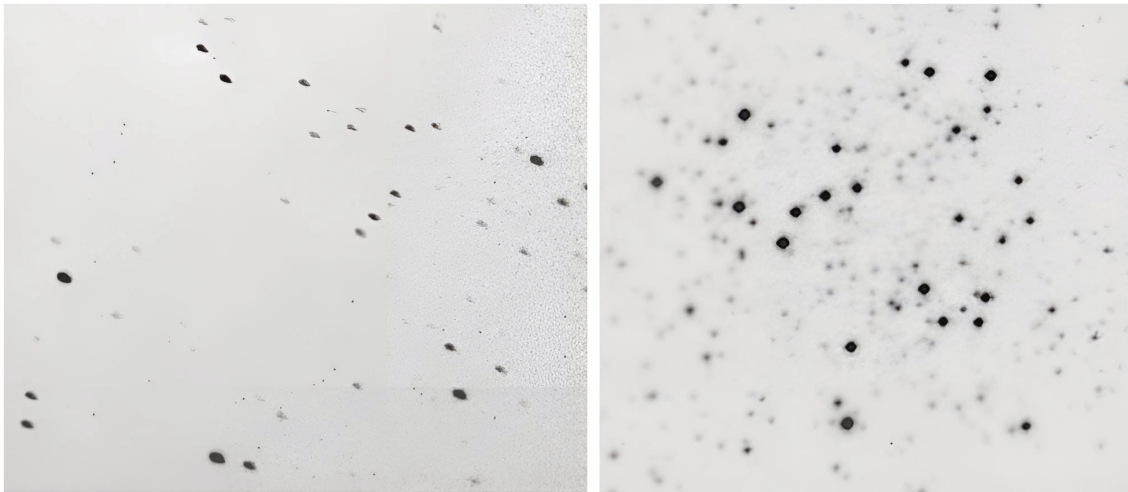
望遠鏡の調整は繊細で時間のかかる作業であり、頻繁に行わないと収差の影響を受けた画像になってしまいます。これは効率の低下(最大1等級)をもたらすだけでなく、非正規の画像を生じさせるため、分析が困難になります。

さらに、使用する焦点面が正しくない場合、球面収差が発生し、画像が左右対称に拡大され(左右対称の収差であるため)、視覚効果の影響と誤解されます。

PuntinoProの助けを借りて、望遠鏡を素早く調整することができます。以下にいくつかの例を示します。



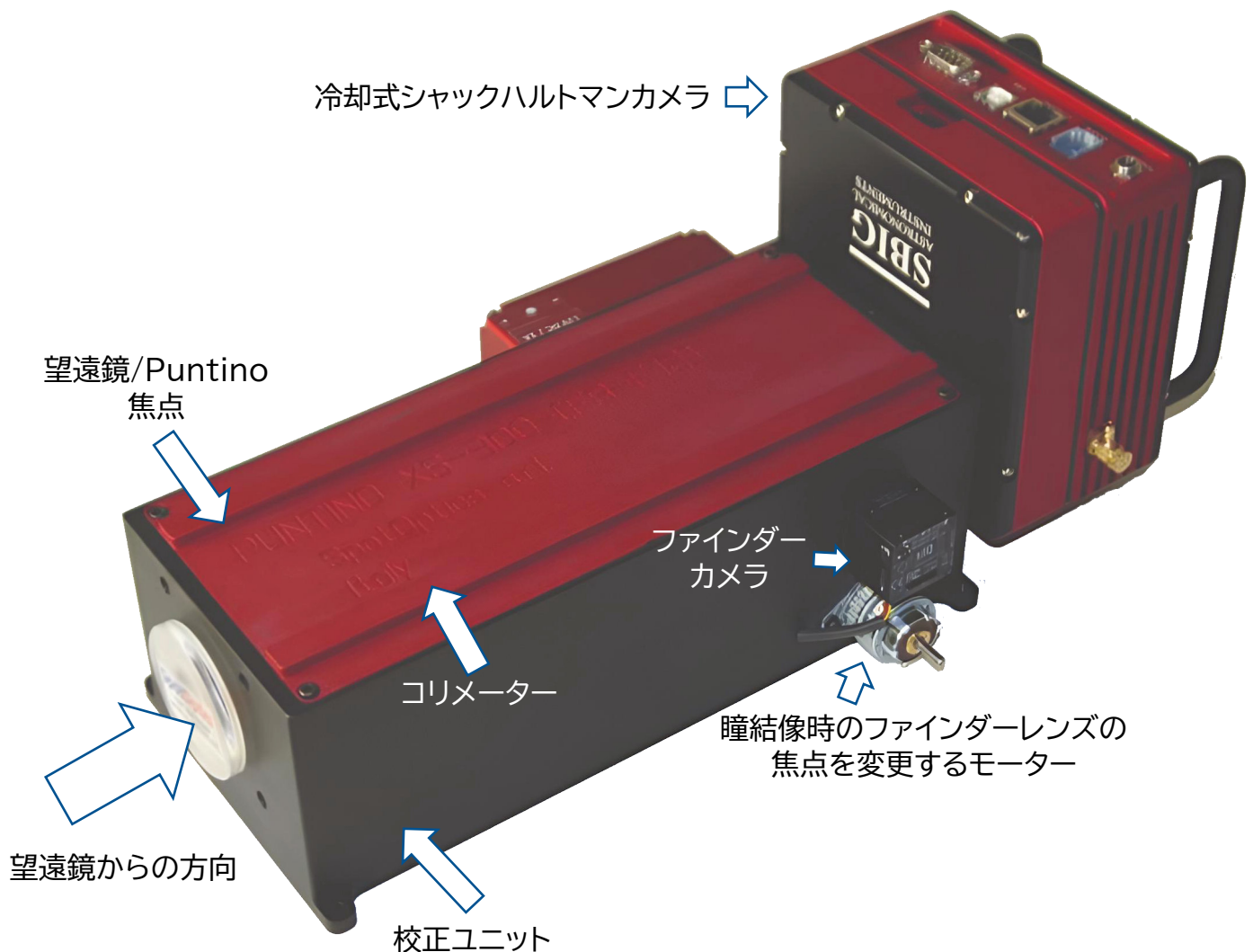
非点収差(中央と左)と三角コマ(右)を持つ2つの望遠鏡の瞳(PuntinoProのファインダーCCDで撮影)。左の2つの画像は焦点内と焦点外で、非点収差による像の伸びと、その間の90度の傾きを示しています。右の画像は、主鏡を支える3つの固定点の調整ミスによる三角形の像を示しています。



非点収差のある望遠鏡(左)からの像で、わずかにピントがずれています。非点収差による画像の伸びに注意してください。EW方向は水平なので、望遠鏡の追尾誤差による伸びではありません。右の写真は、望遠鏡の収差を補正した後の星団M53の中心部です。

3. PUNTINO-PRO:プロフェッショナル天文台用

- 望遠鏡の焦点をテストするための完全に自動化されたスタンドアロンユニット
- 望遠鏡のF/#に合わせたコリメーター内蔵
- 最大44x43スポットのサンプリング(0.3mmレンズレットアレイピッチの場合)
- 夜間の温度変化に伴うPuntinoProの内部光学系の収差を除去するキャリブレーション光源を内蔵(サイトによっては10°Cにもなります)。
- スポット上の大気の影響を除去するための長時間露光シャックハルトマン画像用の冷却カメラ。これを行わないと、望遠鏡の収差測定に深刻な影響を与える可能性があります。
- ファインダーレンズは電動式で、焦点の合っていない瞳の画像を撮影し、分析に使用することができます。
- ファインダーカメラによるシーイング測定用オプションソフトウェア
- 高度なハードウェアとソフトウェア機能



4. PUNTINOミニセンサー

- 小型天文台用に設計
- 長時間露光のシャック・ハルトマン画像用の冷却カメラで、スポット上の大気の影響を除去します。これを行わないと、望遠鏡の収差測定に深刻な影響を与える可能性があります。
- キャリブレーションは、付属の点光源を使用して、夜の初めに行われます。
- 望遠鏡のF/#に合わせた内蔵コリメーター
- テストする望遠鏡の焦点に取り付けます。



5. PUNTINO OMI



- 平行光はクライアントによって提供されます
- 冷却シャックハルトマンカメラ
- 校正は、平行光源を使用して夜が始まる時間に行われます。

6. 特長:概要

- あらゆる光学系の収差を測定(ゼルニケ多項式の36項まで)
- 光学的品質とストレール比の推定
- あらゆる収差に対応する波面を検査
- プログラムが提供する診断を使用して、任意のシステムに焦点を合わせます。プログラムは、補正のための大きさ(mm単位)と方向を示します。
- ソフトウェアが示す指示を使用して、光学系を(数時間ではなく)数分で調整します。アライメントを行うために光学エレメントを移動させるには、ソフトウェアが示す指示(大きさと方向)を使用します。これにより、アライメントの手間が省けます。
- PuntinoProによって測定された球面収差を使用して、正しい焦点面を見つけます。このプログラムにより、エレメントまたは焦点面を移動させる大きさと方向が示されます。
- 製造中のフィードバックループでこの情報を使用します。
- 低次収差を数学的に差し引いた後の波面マップにより、サポートエラーの特定に使用します。
- 残差のプロットを検査することにより、空気の乱れを特定します。
- 夜間に収差がどのように変化するかをオンラインで見られます。
- 望遠鏡の焦点面における像の移動について、PuntinoProが空の様々な位置に対して与える指示を用いて、望遠鏡の洗練されたポインティングモデルを構築/改良します。
- このプログラムは、特別なソフトウェアモジュールを使用して、ユーザーから提供された温度測定を受け入れることができます。これにより、温度と収差係数の相関関係をチェックすることができます。

次の章では、機器の概要を説明します。PuntinoProのハードウェアとソフトウェアの機能のより詳細なリストは、PuntinoPro用シャックハルトマン解析ソフトウェアSensoftバージョン5.1の機能のセクションにあります。

7. ツール一式

- CCDベースのソフトウェアパッケージを使用したアライメント望遠鏡の初期セットアップ: Alisa
- 望遠鏡の2軸の識別(ALT-AZまたはHA-DEC)
- 主鏡軸とセル中心のアライメント
- 主鏡の軸と望遠鏡の回転軸を合わせます。
- M2のドライブと光軸を合わせます。
- 主鏡と副鏡の初期アライメント
- PuntinoProとSensoftを使用したファインアライメントと調整
- Sensoftの指示(コマ測定)を使用したM1軸とM2軸のアライメント
- Sensoftの診断を使用した正しい焦点面(最小球面収差)の特定

- 非点収差、三角コマ収差、二次非点収差、および低次収差を差し引いた後の鏡面のマップの値を使用して、天頂付近のサポート システムを最適化します。
- 瞳上の残差のマップを使用したドームとミラーの観察の最適化
- 天頂距離による収差の変化とルックアップテーブルの作成
- 内蔵の星選択セクションを使用した天頂距離による収差の校正
- 内蔵の星選択セクションを使用した天頂距離によるサポート システムの最適化
- 2台目のCCDカメラで取得した焦点の合っていない瞳孔の検査
- アライメントテレスコープを取り付けずに、2番目のCCDを使用してM2ドライブの直線性をチェックします。
- 望遠鏡の瞳孔を検査するための2番目のCCDカメラの使用
- 2番目のCCDカメラを使用し、外部シーイング、ドームおよびミラーシーイングを組み合わせた測定

8. アクティブオプティクス: コマ収差と焦点ぼけの補正可動副鏡

- Sensoftで計算された動きの値をイーサネットまたはシリアルケーブル経由でM2の制御システムに渡すことで、コマと焦点を補正することができます。
- アクティブ光学系:主鏡の収差補正
- Sensoftで計算された係数を用いて主鏡の形状をフルアクティブ光学系で補正します。
- この値はTCP/IP経由で制御システムに送ることができます。
- シャックハルトマンデータに基づいて望遠鏡のMTFを計算することができます。

9. シミュレーション

- ゼルニケ波面の生成
- 望遠鏡設計
- 回折解析
- 収差、リップル、微小リップル、シーイング、望遠鏡のポインティング、CCDのピクセルサイズによるMTF

10. SENSOFT:ゼルニケ係数等

Sensoftは、PuntinoProのフルコントロール(CCDカメラを含む)とシャックハルトマン解析を組み合わせたものです。ゼルニケ係数だけでなく、望遠鏡を調整するための診断結果も得られます。

特長	詳細
結果を簡単に解釈できるように設計された仕様	SenSoftは、波面の収差係数をナノメートル単位で表示するだけでなく、焦点面内の収差像による対応サイズ(秒角)も表示するため、結果の解釈が容易になります。
詳細な計算	実際の品質(チルトとデフォーカスのみを除去)、実際の品質(ユーザーが選択したゼルニケ収差項を除去)、潜在的品質(最初の7つのゼルニケ項を除去)の3つのSHループが実行ごとに自動的に計算されます。そのため、現在の望遠鏡の品質、潜在的な望遠鏡の品質、あらゆる収差に関する情報を明確に把握することができます。
エラー解析	係数の誤差と適合度の確率が計算されます。
デフォーカス補正	Sensoft は、副鏡の動きに関して非常に正確な焦点ずれの測定値を提供します。
アライメント: コマの値を使用して補正	Sensoft は、望遠鏡のパラメーターに基づいて、コマ収差の補正に必要な副鏡の動き(偏心または傾斜)(大きさと方向の両方)を提供します。
円錐係数測定	機器の高いダイナミックレンジ(球面収差が約100)により、(双曲面)主鏡の円錐係数が得られます。
測定された球面収差から正しい焦点面を見つける	カセグレン焦点では、Sensoftを使用して、球面収差がゼロの面として定義される正しい焦点面を見つけることができます。望遠鏡のパラメーターに基づいて、球面収差をゼロにするために焦点面をシフトする必要がある大きさと方向がわかります。
非点収差、三角コマ収差、二次非点収差	これらの収差の存在は、サポートエラーの存在を示しています。これらの係数の値をミラーの表面マップと組み合わせて使用することで、ミラーサポートを最適化することができます。
サポートインプリントの高解像度マップ	瞳上の 22x22 スポットのサンプリングにより、低次のゼルニケ項を除去した後、鏡面の高解像度マップが得られます。測定された非点収差、三角コマ収差、および二次非点収差と組み合わせて、ミラーサポートを最適化できます。
解釈を容易にする豊富なグラフ	Sensoft には豊富なグラフが含まれています: フルバージョンでは37です。
空気の影響によるノイズを軽減するための平均化	複数のSHフレームの係数を平均して、乱流やドーム効果によるノイズを低減できます。
高速計算ループ	一連の計算には2秒もかかりません。
ドームとミラーの視認性の最適化	シャック・ハルトマン解析後の瞳上の残差のプロットを使用して、ドームとミラーの観察を調査できます。2台目のCCDカメラからの瞳孔画像も使用できます。
詳細なヘルプ	最も基本的な概念について非常に詳細に説明した広範なヘルプ。

11. PUNTINOPROの取り付け

毎晩、観測を始める前に望遠鏡の状態をチェックすることが望ましいです。通常の観測スケジュールに支障をきたさないよう、望遠鏡は軸外に設置できるように設計されています。校正光源のリモートコントロールが装備されており、夜間の温度変化や望遠鏡の位置変化を補正するために必要な頻度で基準枠(装置収差の校正用)を取ることができます。

PuntinoProの軸外常設マウント	
平面鏡の使用	PuntinoProは軸外に取り付けることができ、フラットミラー(テスト終了後に取り外す)を反転させることで、望遠鏡からの光をPuntinoProに向けることができます。これにより、毎晩、観測開始前にテストを行うことができます。
ガイドの一部として	適切な光学系を使用することで、PuntinoProは望遠鏡のガイドユニットの一部となり、夜間でも使用することができます。ガイダーは軸外で使用されるため、望遠鏡の軸外(フィールド)収差を除去する必要があります。古典的なカセグレン式望遠鏡の場合はコマ収差と非点収差、リッチェイ・クレチアン式望遠鏡の場合は非点収差のみです。これらの値は望遠鏡のパラメータに依存し、Sensoftに入力することで、これらの収差の影響を取り除くことができます。

12. SHテストの頻度

理想的には、テストは一晩中継続的に実行する必要があります。ただし、それが不可能な場合は、検査を夜の初めに行う必要があります。

13. 校正の頻度

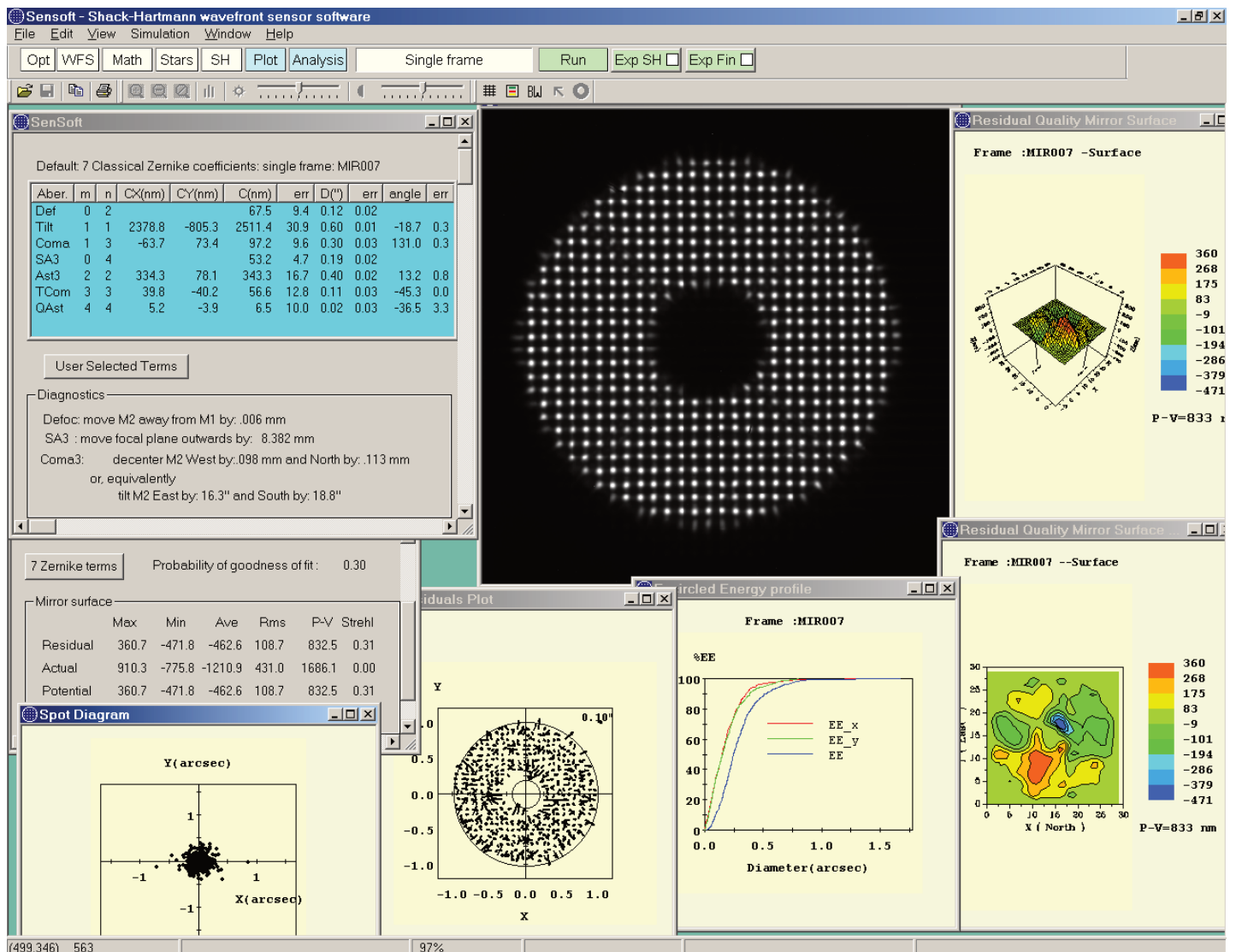
PuntinoProの校正フレームは、温度が数度変化するたび、または望遠鏡が大きな角度を移動したときに取得する必要があります。

14. SENSOFT: 機器の制御と分析

Sensoftは、PuntinoProを完全にコントロールします。

プログラムを初めて実行するときいくつかのパラメーターを指定すると、一晩中使えるようになります。Shack-Hartmannフレームの解析も、マウスを1回クリックするだけです。

適切な Shack-Hartmann フレームを取得して分析し、最初の結果を1分以内に得ることができます。



グラフの一部が表示されたSensoftのグラフィカルユーザーインターフェース

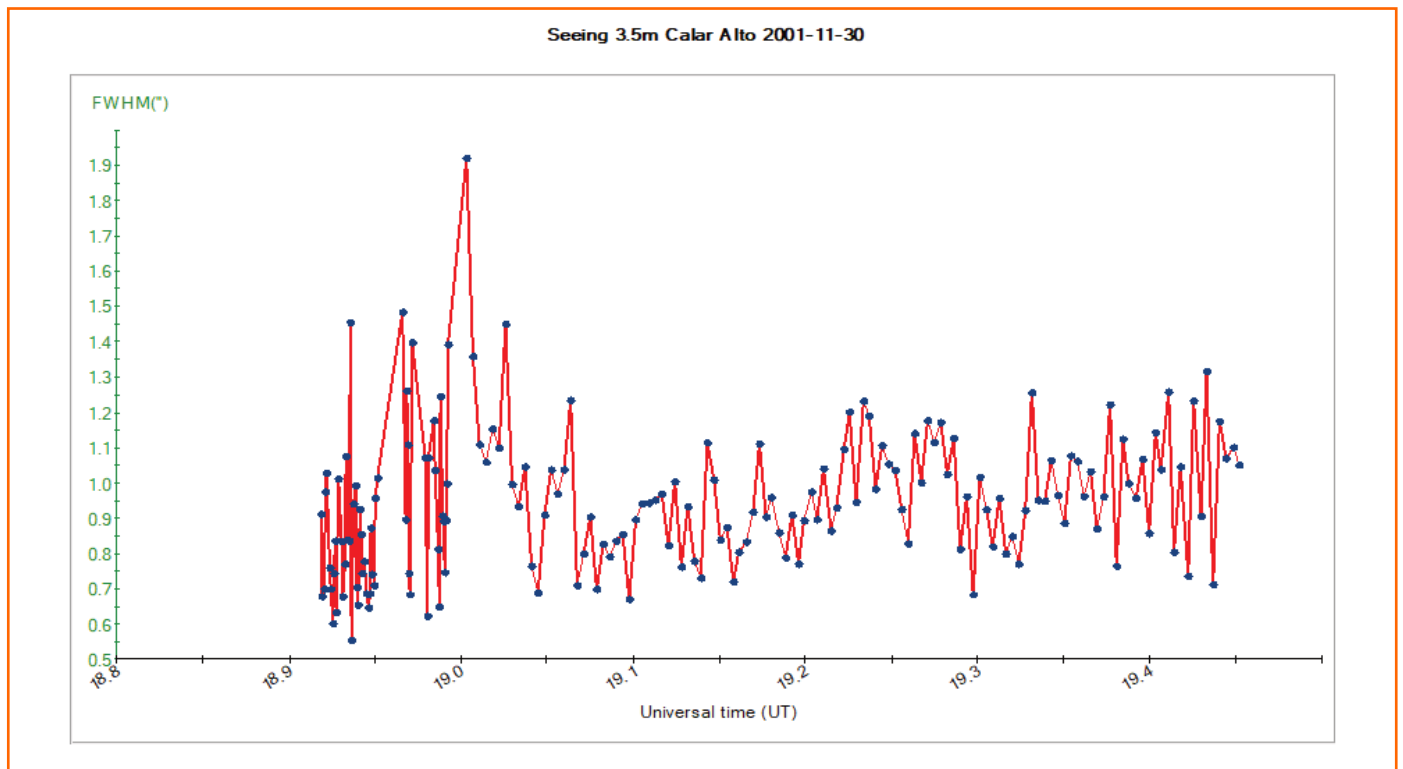
15. PUNTINOPROの機能概要

ハードウェア
スポット数:約40x40(標準)。ご要望によりそれ以上の数も可能
球面収差をより確実に測定するための高サンプリング
2台のカメラ(1台はSH画像用、もう1台は直接画像用)。SH画像取得用カメラはCCDカメラで、ユーザーが選択可能(冷却カメラなど)。直接撮像用のカメラはCMOSカメラで1280x1024ピクセル、サイズは5.4 μ
校正用光源のステッピングモーターをPCから遠隔制御
計器の形状:箱型、前面フランジに取り付け用のM-6穴が4つ
ソフトウェア:制御及び解析
CCDとモーター制御をソフトウェアで統合
最大34のゼルニケ項(ザイデル項、標準項、フリンジ項、環状項)の係数 - ユーザーが選択
波面(P-V、rms)、ストレーラ比
測定されたデフォーカス、コマ収差、球面収差を補正するソフトウェア表示
高度な画像解析
2番目のCCDで記録された焦点内および焦点外の画像
ノイズがある場合のゼルニケの測定精度(シーイングに依存): $\sim 0.1''$
空気の影響によるノイズの影響を軽減するため、SH解析で得られた係数を平均化
夜間の収差変動のプロット
天頂距離による収差の校正のためのプログラム内の星カタログ
PuntinoPro のオプション機能
シャックハルトマンデータからのMTF、PSF、EEの計算
アクティブ光学系のオンライン制御
2番目のカメラを使用して、全体の見え方(外部、ドーム、ミラー)を測定
副鏡の焦点駆動の直線性の校正
シミュレーション: ゼルニケ波面の生成、望遠鏡の設計および回折解析(収差による MTF、リップル、マイクロリップル、シーイング、望遠鏡のポインティング、CCD のピクセル サイズ)
高速 (50Hz)チップチルト補正

16. MIMMSOFT:測定値を見るためのソフトウェア

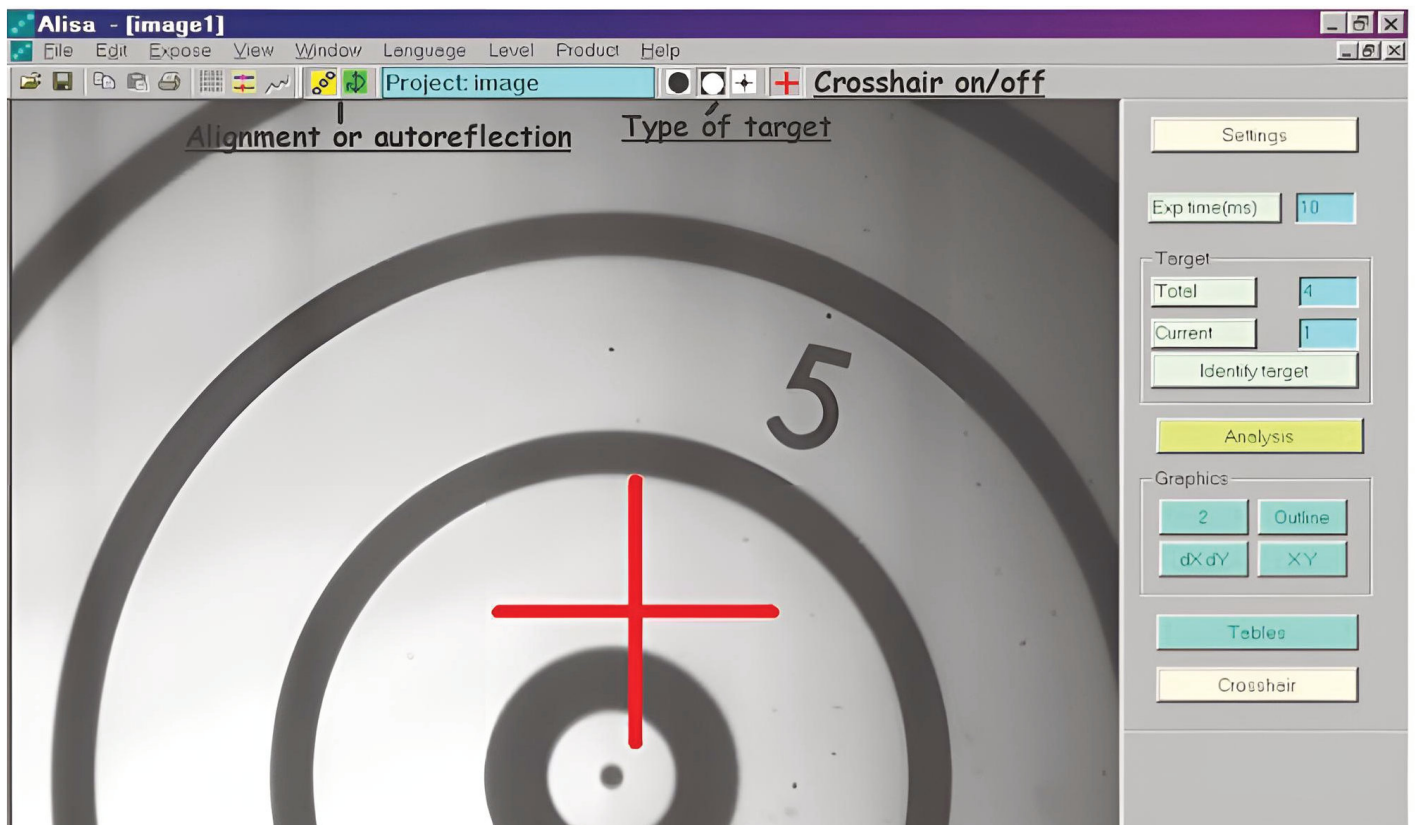
MIMMSOFT は、天体観測を測定するためのソフトウェア パッケージです。そのハイライトは次のとおりです。

- 単一の絞り(風揺れが問題にならないように大きな望遠鏡の焦点など)またはDIMM(デュアルイメージモーションモニター)を使用して視覚を測定するために使用できます。
- Puntinoのファインダーカメラ、SpotOpticsの望遠鏡テスト用シャックハルトマン波面センサーと併用可能です。したがって、シャックハルトマン解析から得られる収差に関する詳細な情報と組み合わせることで、ドームとミラーシーイングの効果を含む望遠鏡の性能の全体像を得ることができます。
- FWHM(視覚)、(画像の動きの2D分散)、または r_0 (フリードパラメータ)の測定値をリアルタイムで測定および表示します。
- データを保存し、後で取り出してプロットすることができます。
- r_0 の計算には1000フレームまで使用可能。
- 最短0.01msの露光時間(もちろん明るい星の場合)で、シンチレーション・インデックスの計算に1MHzの非常に大きなバンドパスを使用することができます。
- 正確なセントロイディングのための露光時間の自動最適化
- MIMMSOFTはSensoftのオプションパッケージであり、スタッドアロンパッケージもあります。



17. ALISA:マイクロアライメント用ソフトウェア

完全なソリューションを提供するという当社の理念に沿って、アライメント望遠鏡やオートコリメータと併用するための Alisaソフトウェアとカメラも提供しています。これは、望遠鏡の初期位置合わせとセットアップに使用でき、接眼レンズをデジタル カメラに置き換えることで、面倒な位置合わせの手間を軽減します。ターゲットの画像はソフトウェアによって取得および分析されます。



18. 技術仕様

テストできる要素の種類	天体望遠鏡(カセグレン式、主焦点式、ニュートン焦点式)。 研究室の望遠鏡、レンズ
対象となる焦点比	f/1.8からf/300が標準。より速い焦点比は特別なセットアップで テスト可能。
レンズレットの焦点距離	41mm
瞳孔の標準サンプリング	約40x40
最大サンプリング	最大65x65スポット(カメラによる)
解析ソフトウェア	SenSoft
ゼルニケ多項式係数の精度(実験室)	$\lambda/300$
ゼルニケ多項式係数の精度(望遠鏡)	0.01"
波面の計算精度	$\lambda/150$ rms
波長範囲	標準カメラで0.375から1.1 μ まで
基準光源	LED。遠隔操作可能
フランジから装置焦点までの距離	54.8mm
ベースからの光軸の高さ	51.5mm
SH用カメラ	16ビット冷却CCD
ファインダー用カメラ	10ビット非冷却CMOS、1,280x1,024ピクセル、5.4 μ ピクセル サイズまたは14または16ビット冷却CCD
寸法(焦点比に依存)	9(高さ) x 22(長さ) x 9(幅) cm
所要電力(ステッピングモーター)	12V、1000mA

注記と説明:

- ご要望に応じて、異なる直径のレンズレットをご用意いたします。
- ご要望に応じて、異なる焦点距離のレンズレットをご用意いたします。

19. 機能の詳細:PUNTINOPROとSenSoft

カセグレン焦点の望遠鏡
ニュートン望遠鏡
一眼
複数のコンポーネントからなるレンズ
収差を補正するためのキャリブレーション
Puntino によって測定された収差を補正するためのキャリブレーション (経験的、レイトレーシングまたは解析による)
波面センサー構成
サポートされているオペレーティング システム
CCDカメラの数
A/D変換のビット数(カメラに依存)
シャックハルトマンCCD の選択とセットアップ - 取得、自動ダーク減算、ビニング、該当する場合は温度制御。
シャックハルトマンCCD フレームの方向の指定 - コマ収差の補正の方向を定義するために使用されます。 波面マップ上で方向を定義する場合にも使用します。
ファインダー CCD の選択とセットアップ - 取得、自動暗算、ビニング、温度制御 (該当する場合)
ご要望に応じてその他の CCD (可能な場合)
基準光源の遠隔制御
ステッピングモーターの動き
ステッピングモーターの診断
画像解析
フレームの表示、TIFF/FITS形式での保存、コントラスト強調、明るさ強調、ズーム
画像演算(フレームの加減乗除)
シャックハルトマン分析
ゼルニケ係数、波面、ストレール比の計算
計算用のミラーまたは波面の選択
重心計算の自動しきい値
瞳孔の環の選択
80% および 50% の囲まれたエネルギー値を含む直径
残差の実効値
楕円率に基づくスポットの拒否
データに適合するザイデル、標準、フリンジ、または環状ゼルニケ項の選択
ザイデル項、標準項、フリンジ項、環状ゼルニケ項の最大数
最小二乗フィットのための追加ゼルニケ項の選択
複数のSHフレームから計算された平均値
望遠鏡の光軸に対するPuntinoの光軸の変位の計算
楕円度、S/N比、瞳孔上のスポットのフラックス分布を確認するためのプロット。
解析中の3つの計算ループ: 実際の品質、潜在的な品質、実際の品質

ゼルニケ波面の生成
ザイデル、古典、または環状ゼルニケ多項式
追加する項(係数と角度)の選択
追加するノイズの種類を選択 ガウスまたはランダム
複数のフレームの平均
スポット数(最大70)
光学素子とシャックハルトマングリッドの光学パラメータ
プロット
結合フレーム
エネルギープロファイル
残差
スポットダイアグラム
波面コンターと3Dプロット
解析理論に基づく望遠鏡設計
カセグレンまたはグレゴリアン(リッチー・クレチアン、クラシカルまたはダール・カーカム)
プロット フィールド収差
コマ収差
非点収差
サグ
デフォーカス
歪曲収差
プロット:非点収差
ズレによるコマ収差
誤った焦点面による球面収差
解析理論に基づく回折計算: MTF、PSF、EE
収差:デフォーカス、球面収差
ディテクターのピクセルサイズ
光学面のリップル
光学面の微小リップル
望遠鏡のポインティング精度
大気シーイング
正規化周波数またはライン/mmの関数としてのMTF
PSFとEEの角度または無次元半径の関数
収差のスポットダイアグラムからMTF、PSF、EEを計算
SH分析から計算されたMTF、PSF、EE
プロット
正規化周波数またはライン/mmの関数としてのMTF
PSFとEEの角度または無次元半径の関数

20. PUNTINOPROとSenSoftのオプション機能

シャックハルトマン解析によるMTF、PSF、EE
SH解析から計算されたMTF、PSF、EE
プロット
正規化周波数またはライン/mmの関数としてのMTF
PSFとEEを角度または無次元半径の関数としてプロット
M2ドライブの直線性の校正
アクティブ光学系のオンライン制御
コマ収差と焦点ぼけを補正するためのM2の動きの値は、M2モーター制御に渡されます (同じPCまたは別のPC - シリアルポートまたはイーサネット経由)
ゼルニケ係数の値は、イーサネット経由で能動光学系制御ループに渡されます。
高速読み出しを使用した50Hzの周波数でのチップチルト測定
見え方
ファインダーCCDを使用したr0、見え方、シンチレーション指数の計算
プロット
r0、時間の関数としての視認性とシンチレーション指数

21. 波面測定

波面 W =	A1 x 焦点
	+ A2 x ティルト
	+ A3 x コマ
	+ A4 x 球面収差
	+ A5 x 非点収差
	+ A6 x 三角コマ
	+ A7 x 二次非点収差
	+ An.. x 高次のゼルニケ収差
	+ ノイズ (空気の影響)

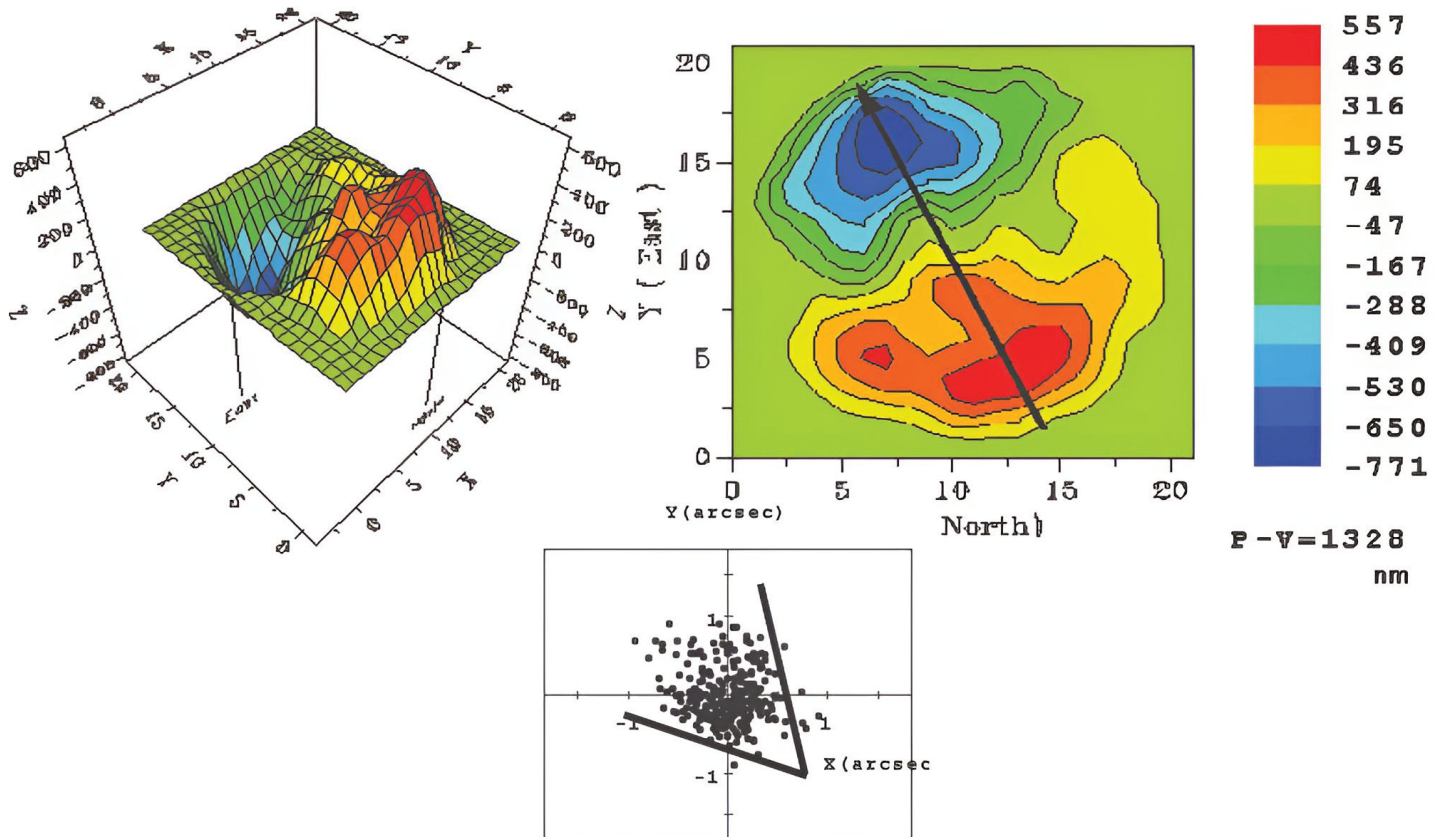
Sensoft は、収差波面 W の導関数を測定し、収差の係数 (A0、A1、A2、A3、A4、A5、A6、および An..) の値 (ゼルニケ係数) を推定します。様々な収差項の形式は後で個別に説明します。Sensoftは最大34項までのフィッティングが可能です。

次のページでは、その例を紹介します：

- コマ測定と補正による望遠鏡ミラーのアライメント
- 非点収差と三角コマ: サポートに問題がある場合の指標
- 問題がある光学ミラーの個々のサポートを特定
- ドームと鏡の観察 (天体望遠鏡) または気流 (研究室/作業場) が最適化されているかどうかを確認
- オンラインで収差をモニターすることにより、最適なセットアップを維持
- 結果はSensoftから提供

22. 例

22.1. 望遠鏡のアライメント



Puntinoによって測定された1.5m望遠鏡の波面とコマのスポットダイアグラム。線はコマ像の円錐を定義しています。Sensoftによって与えられたコマ像のサイズは1.1"、角度は116度です。スポットダイアグラムは高次収差の存在によって影響を受けます。

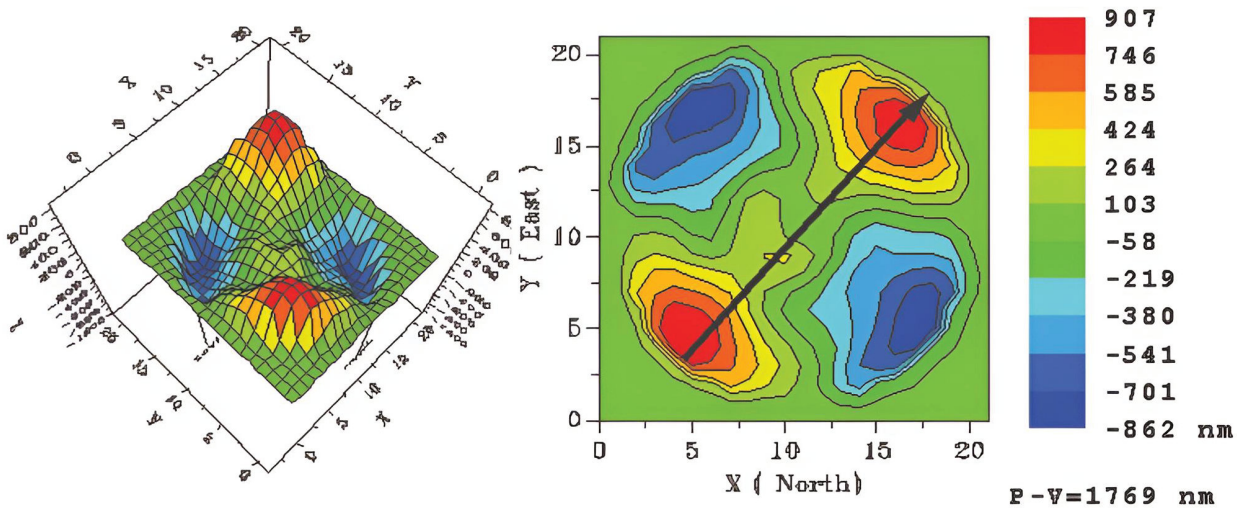
望遠鏡のパラメータに基づいた校正を使用し、Sensoftは補正に必要な副鏡の動き(偏芯または傾き)を、大きさと方向の両方で提供します。アライメントは数回の繰り返しで達成でき、精度は望遠鏡の機構によってのみ制限されます。望遠鏡の正確なパラメータがわからない場合は、近似的なパラメータを使用することができます。いずれにしても、測定されたコマがゼロになれば、正しいアライメントが達成されます。一旦これが達成されれば、この経験的校正はその後でも使用することができます。

以下は、測定されたコマを補正するための指示とともにSensoftが出力する例です。これらの値は望遠鏡の手動調整に使用することも、副鏡がアクティブに制御されている場合は制御システムに渡すこともできます：

❑ Decenter: M2 West by: 1.389 mm and North by: 3.145 mm
Or, equivalently

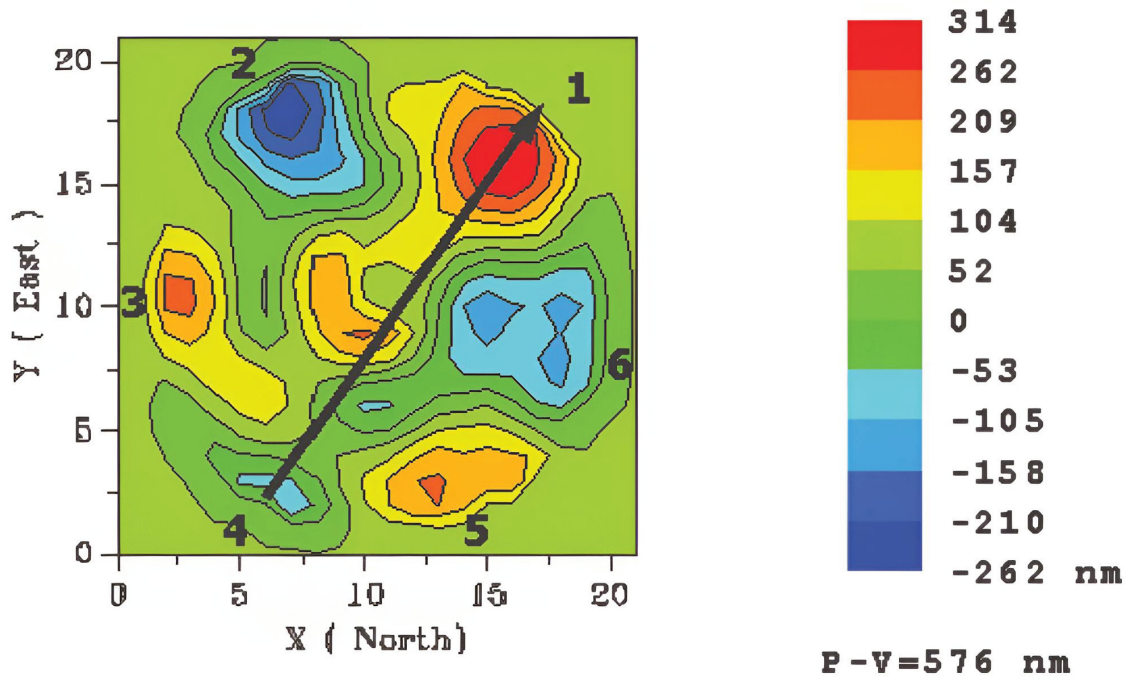
❑ Tilt: M2 East by: 100.6" and South by: 227.7".

22.2. 非点収差と三角コマ

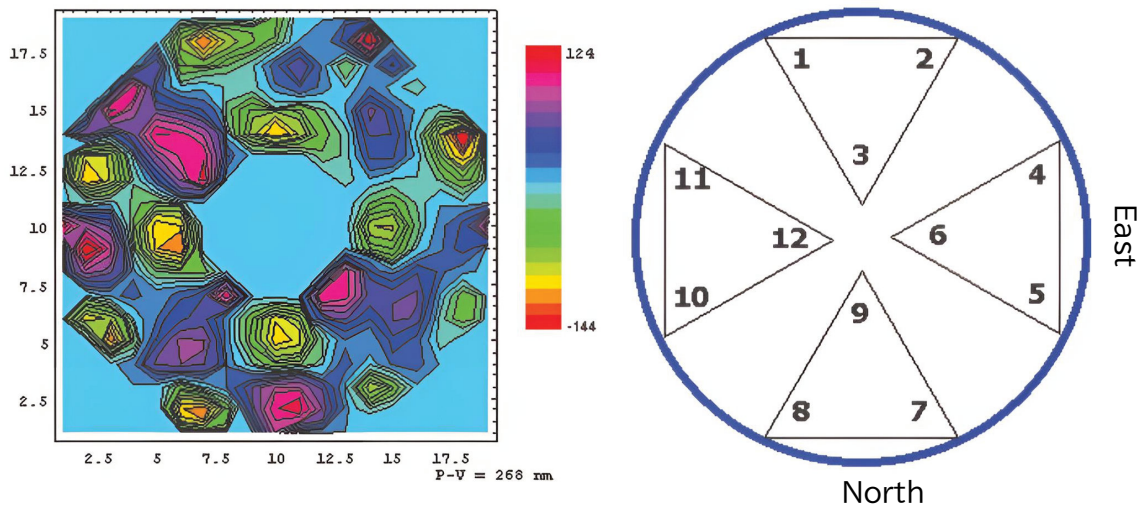


非点収差は、視野収差として発生することもあるが、ミラーの形状に起因して発生することもあります(この場合、その形状と大きさは視野にわたって一定です)。鏡は研磨中に非点収差の形状になることがあり、また鏡の取り付けシステムによって間違った力が加えられることもあります。上の図は、Puntinoが測定した1.5m望遠鏡の非点収差のみの波面を示しています。これは45度の方角角を持っており、支持誤差に起因しています。

次の図は三角コマの存在を示しており、これも支持誤差が原因です。



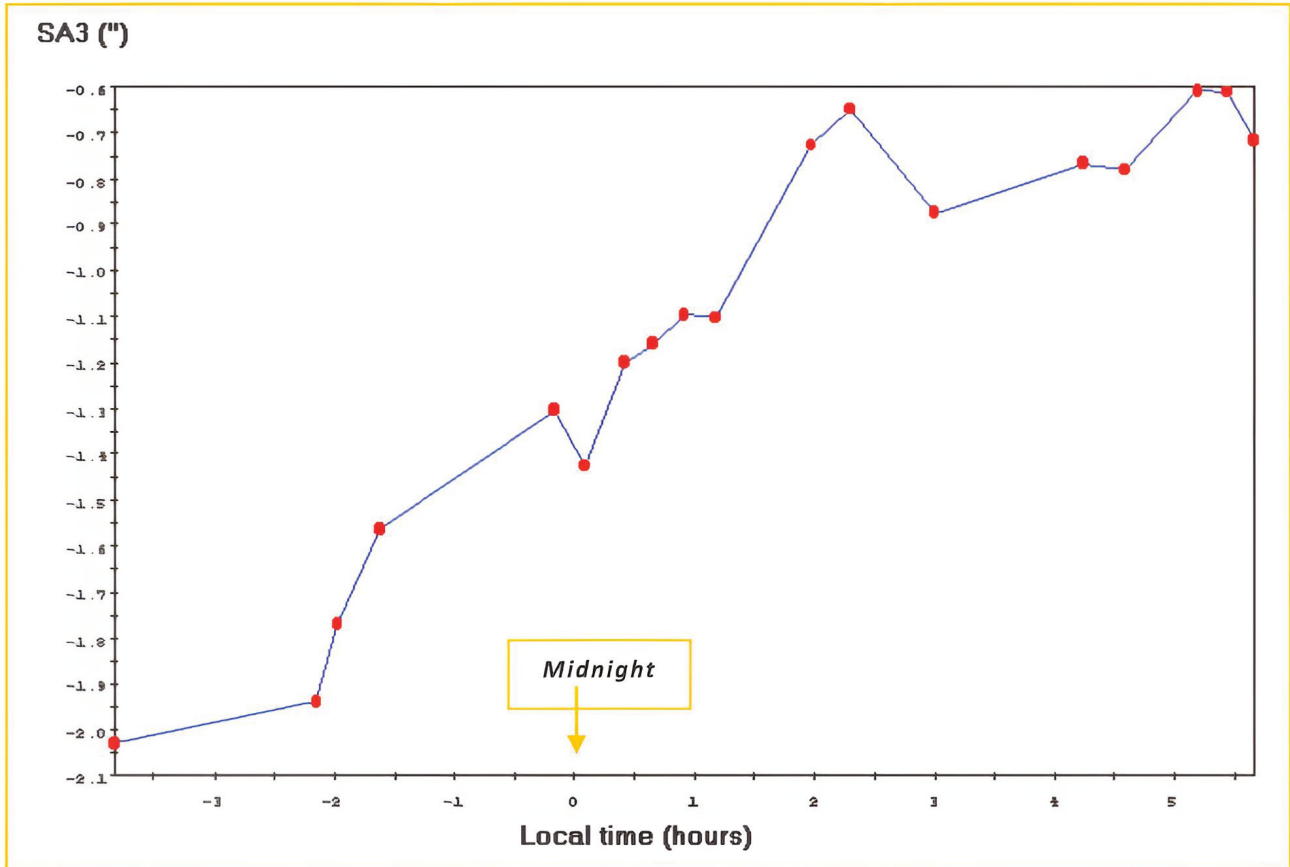
22.3. サポートエラー



左の波面プロットは、Puntino/Sensoftによって測定された低次収差を数学的に差し引くことによって得られました。これは、1.5mミラー(特に薄い:アスペクト比(直径/厚さ)は45)にサポートの問題があることを示しています。右側はサポートの分布図です。左の図では、サポートの痕跡がはっきりと見えます。

このような支持体の誤差があるからこそ、上に示したような大きな非点収差や三角形のコマが生じます。波面の形状(高さと低さ)を知り、方位情報を考慮することで、支持体を素早く調整することができます。

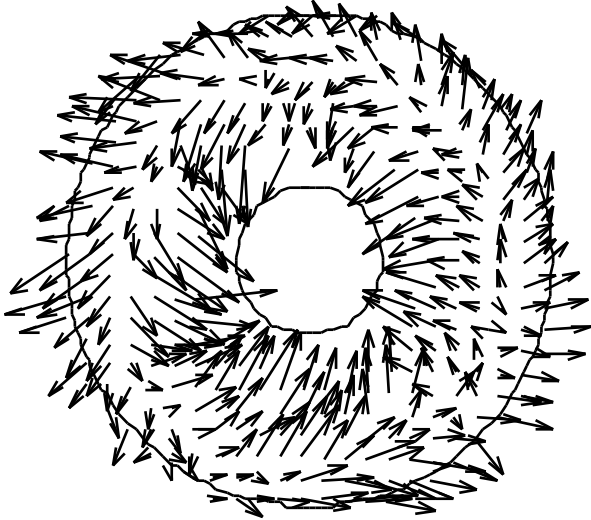
23. 温度の影響



上のプロットは、夜間の球面収差の変化を示しています。約-2.1インチから-0.6インチ(球面収差のみによる像の直径)に変化しました。これはドームの温度が変化し、ミラーの形状が変化したためです。

このようなプロットは、PuntinoPro/Sensoftから7つの基本収差について入手できます。これは望遠鏡の性能を分析し最適化するための強力な診断ツールです。

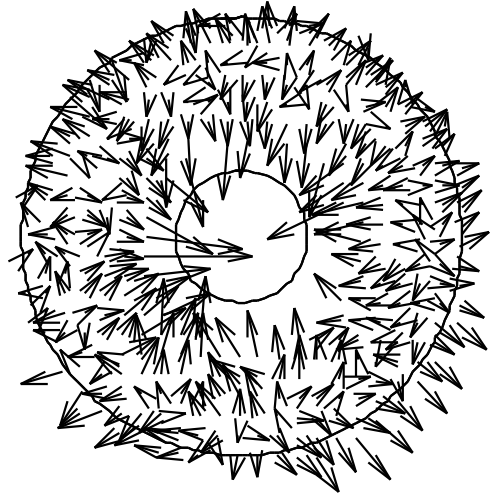
24. ドームと鏡が見える状態での測定



1.2m望遠鏡のシャックハルトマングリッドによってミラー波面がサンプリングされた点での残差のプロットです。左側の残差は、デフォーカスとチルトという2つのゼルニケ項を数学的に除去した後にプロットされています。

右は、7つのゼルニケ項を削除した後のプロットです。どちらの場合も、ミラー上の熱気が主鏡のバッフルに巻きつき、ミラー上に渦を巻き起こしていることがわかります。

この場合のSA係数は 83.8 ± 4.7 nm、つまり 0.89 ± 0.05 インチでした。



ここでは望遠鏡が別の方向を向いており、強い風がドームに吹き込んでいました。これは明らかに鏡についた熱気を吹き飛ばす効果がありました。この場合のSA係数は、左の場合と同様に 73.7 ± 4.7 nm または 0.78 ± 0.05 インチで、空気の影響が存在するにもかかわらず収差係数の信頼できる推定値を取得できることを示しています。

25. SENSOFTからの出力

環状ゼルニケ係数とその角度					
Aberration	c_x(nm)	c_y(nm)	cf(nm)	D(″)	angle(Φ)
Def 02			1±16	.01±.06	
Tilt 11	2056±40	1190±38	2375±54	1.31±.03	30±1
Coma 13	-66±9	150±10	164±13	1.15±.09	113±2
SA3 04			-33±7	-.26±.05	
Ast3 22	228±19	250±19	338±20	.91±.06	47±0
TCom 33	67±13	97±13	118±16	.55±.07	55±1
QAst 44	18±10	8±10	20±11	.14±.08	25±3
ウェーブフロント (nm)					
Max	Min	Peak-Valley	Rms	Strehl ratio	
311	-289	-599	109	.31	
適合度:1000					

CCDフレームの向き(方向校正に使用)			
+X	-X	+Y	-Y
West	East	South	North

装置光軸のシフト	
3.543mm West	.61mm South

診断 (測定された3つの収差を修正するため)		
収差	動作	移動
デフォーカス	M2をM1から遠ざける	0.000 mm
球面収差(SA3)	焦点面を外側に移動	143.205mm
コマ	M2を偏芯させる	1.389mm (WEST) 3.145mm (NORTH)
	または同等に M2を傾ける	100.6″ (EAST) 227.7″ (SOUTH)

Sensoftには非常に詳細なオンラインヘルプが付属しています。

26. 完璧な画像と収差による劣化

2種類の収差:形は同じですが、起源が異なります。

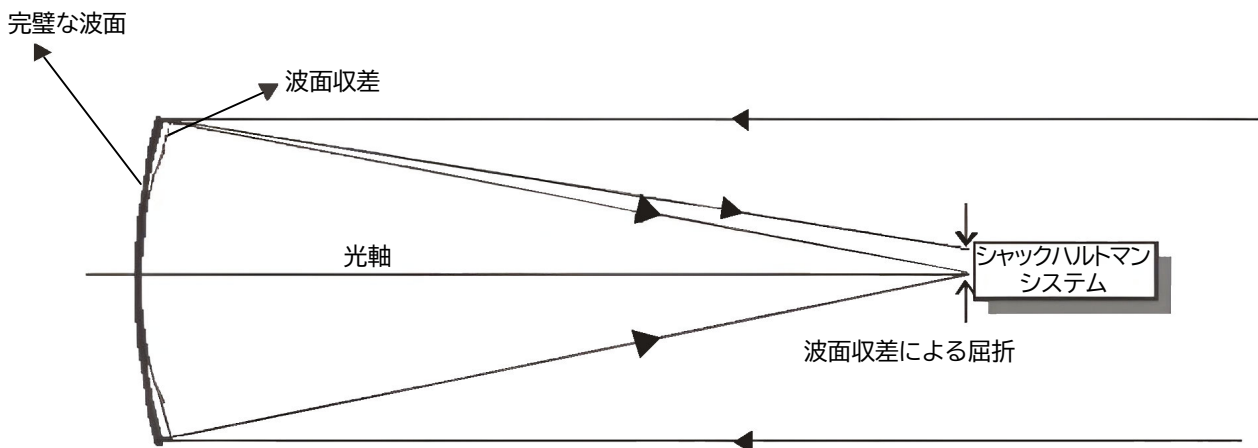
収差(ラテン語のaberrare「ずれる」が語源)は、像の広がりを引き起こし、解像度と望遠鏡の効率を低下させます。

コマ収差、非点収差、球面収差などの収差はよく知られています。これらの収差は2つの理由で発生します:

フィールド角によって変化するフィールド収差: 光軸上の物体に対しては完璧な像を結ぶ光学系も、軸外の物体に対してはそうなりません。これらはフィールド収差と呼ばれ、光軸に対する入射光線の角度の何乗かに応じて変化します。特定の光学系では、その大きさは光学設計に依存します。

フィールド上で大きさが一定である収差: 軸上画像にも収差が存在することは意外に思われるかもしれませんが。これらの収差は、フィールド角に依存しないことを除けば、古典的な軸外収差と同じ形をしています。

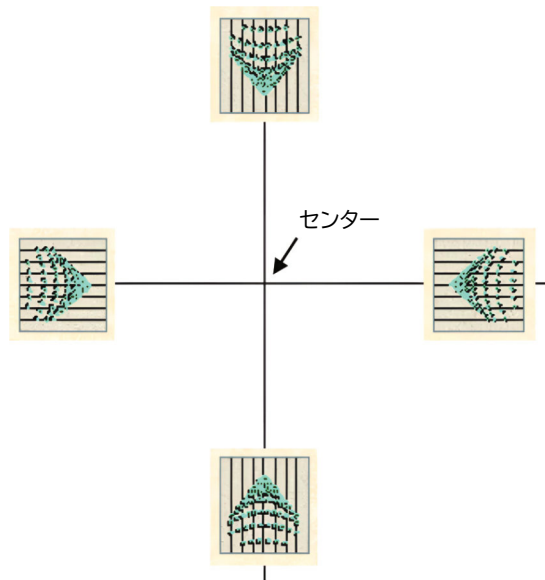
収差のある波面と、それに対応する焦点面内の変位。



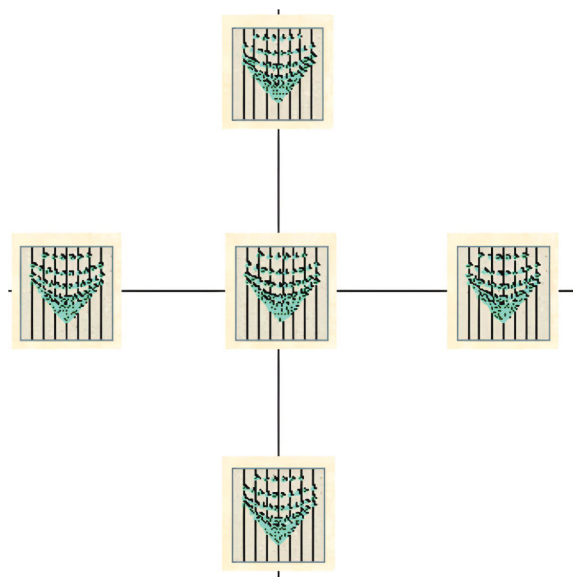
収差は転送された瞳で測定されます:焦点の後に置かれたコリメーターは光を平行にします。瞳の位置に置かれたレンズレタアレイは、ディテクター上で波面の個々の点(ゾーン)から画像(スポット)を形成します。波面に収差がなければ、スポットの完全なマトリクスが得られます。収差がある場合、個々のスポットはずれています。このずれを測定し、これらのずれに数学的関数を当てはめると(ゼルニケ多項式)、収差の係数が得られます。

26.1. コリメーション誤差によるコマ

フィールド収差としてのコマは、光学設計に固有のものです。例えば、古典的なカセグレン式望遠鏡（主鏡が放物面、副鏡が双曲面）ではフィールドコマが発生しますが、リッチー・クレタイン式望遠鏡（主鏡、副鏡ともに双曲面）では発生しません。コマ像が視野の中心を指していることに注意してください。



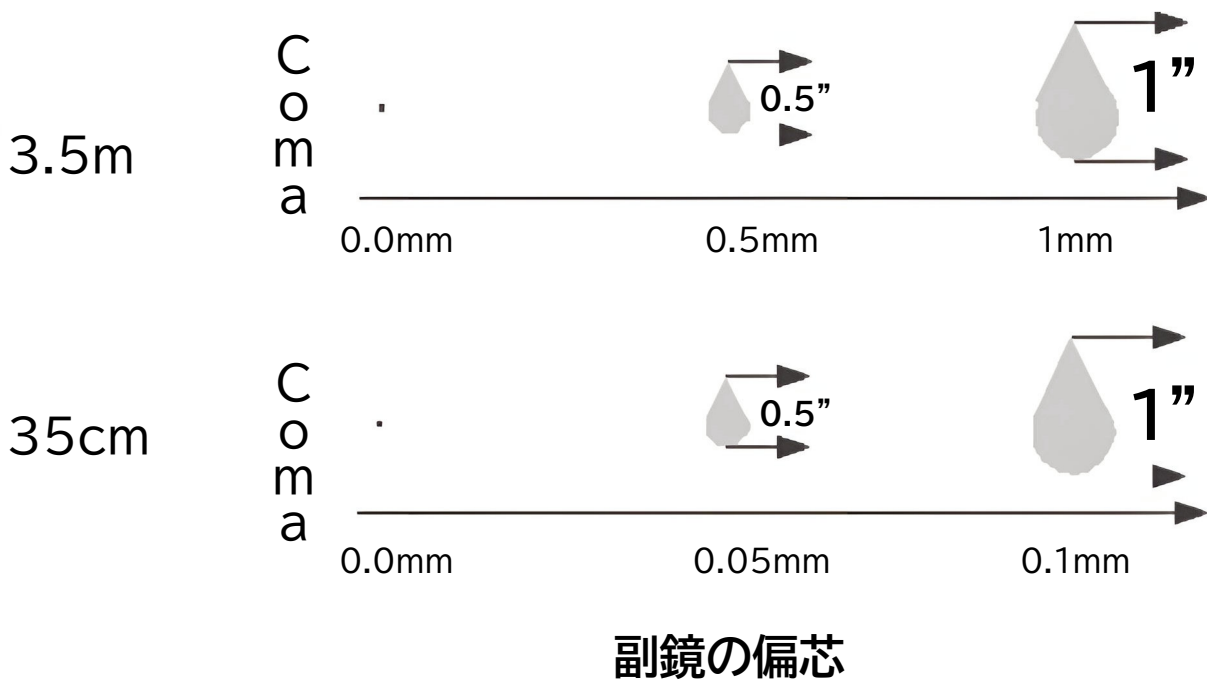
ミスアライメントによるコマ（コリメーションエラーとも呼ばれる）は、2枚のミラー（またはレンズ）システムにおいて、主鏡と副鏡がアライメントされていない（一方のミラーが他方に対して傾いている、または偏芯している）場合に発生します。この場合、同じ大きさで同じ方向を向いたコマ像が、フィールドの中心を含むフィールド全体に形成されます。フィールドのコマは光学設計に固有のものです。ミスアライメントによるコマは測定できれば取り除くことができます。これがPuntinoで実現されていることです。



26.2. 通常の望遠鏡におけるこれらの収差はどの程度重要か？ コマの程度

直径3.5mと35cmの2つの典型的なF11望遠鏡のコマの大きさを示します。

収差は主鏡が速いほど大きくなります。

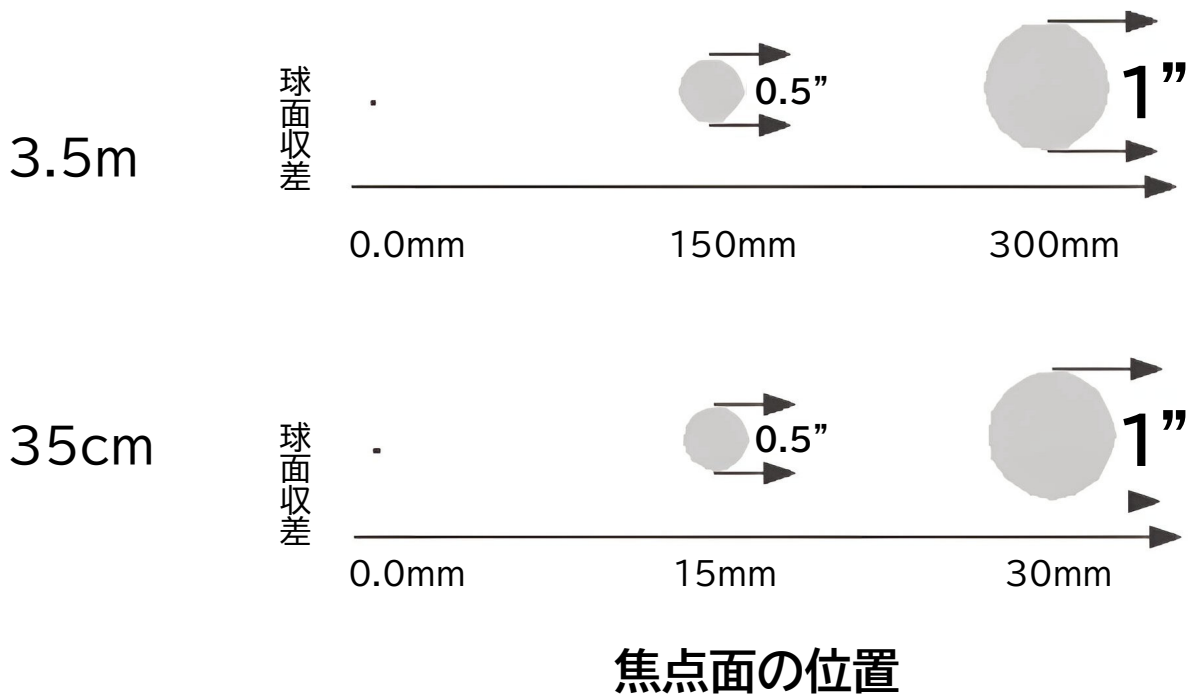


経験則として、標準的なf/10望遠鏡では、1mmの偏心に対して1インチのコマ像が得られます。一方、f/2望遠鏡（他の光学パラメータは同じ）では、より厳しい許容誤差が必要になります。わずか $1/(10/2)^2 = 0.04$ mm（40マイクロン）!の位置ずれによって1インチのコマ収差画像が得られます。（式に関するセクションを参照してください。）

26.3. 球面収差

球面収差は、光学設計に欠陥がなくとも、焦点面が正しい位置にないと発生することがあります。また、光学設計や焦点面が正しくても、温度変化により主鏡と副鏡の形状が異なる速度で変化し、球面収差が発生します。

望遠鏡の焦点面は、リフォーカスすることで簡単に変えることができると思われがちです。しかし、リフォーカスした像は球面収差の影響を受けます。



26.4. コマの大きさ

以下の式は、ミスアライメントによるコマ像の長さが2枚鏡望遠鏡のパラメータにどのように依存するかを示しています：

$$\frac{l}{f} \frac{3(m-1)^3}{32F^2} \left[K_2 - \left(\frac{m+1}{m-1} \right) \right]$$

ここで、 l は主鏡と副鏡の直線ずれ、 m は望遠鏡の倍率(f_{tel}/f_1)、 F は望遠鏡の焦点比、 K_2 は副鏡の円錐係数です。コマの値はラジアン単位です。

式から明らかなように、コマは以下の場合に大きくなります：

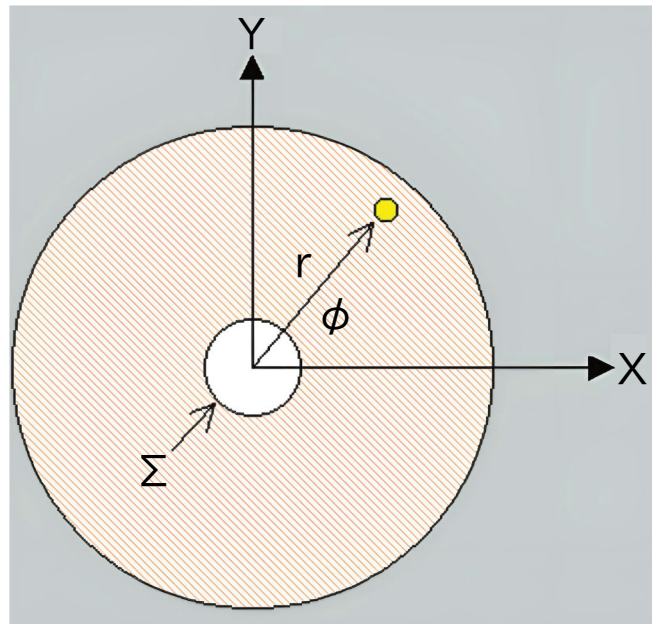
より高速の望遠鏡(すなわち F 比 F が小さい)。

倍率 m が大きい望遠鏡。

焦点距離 f が短い望遠鏡。

経験則として、標準的な $f/10$ 望遠鏡では、1 mm の偏心に対して 1 インチのコマ像が得られます。一方、 $f/2$ 望遠鏡(他の光学パラメータは同じ)では、より厳しい許容誤差が必要になります。わずか $1/(10/2)^2=0.04$ mm (40ミクロン)! の位置ずれによって 1 インチのコマ収差画像が得られます。

26.5. 環状ゼルニケ多項式の7つのゼルニケ項の式



r は正規化された瞳の半径、 ϕ は方位角、 ϕ_n は収差の向きゼロ点です。 Σ は瞳孔の正規化された半径です。

名称	標準的な環状ゼルニケ多項式	ザイデル多項式
ティルト	$2 \frac{r \cos(\phi + \phi_0)}{(1 + \varepsilon^2)^{1/2}}$	$r \cos(\phi + \phi_0)$
デフォーカス	$\sqrt{3} \frac{2r^2 - (1 + \varepsilon^2)}{(1 - \varepsilon^2)}$	r^2
コマ	$\frac{\sqrt{8} [3(1 + \varepsilon^2)r^3 - 2(1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^4)r] \cos(\phi + \phi_1)}{(1 - \varepsilon^2) [(1 + \varepsilon^2)(1 + 4\varepsilon^2 + \varepsilon^4)]^{1/2}}$	$r^3 \cos(\phi + \phi_1)$
3次球面収差	$\sqrt{5} \frac{6r^4 - 6(1 + \varepsilon^2)r^2 + (1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^4)}{(1 - \varepsilon^2)^2}$	r^4
5次球面収差	$\sqrt{7} \frac{20r^6 - 30(1 + \varepsilon^2)r^4 + 12(1 + 3\varepsilon^2 + \varepsilon^4)r^2 - (1 + 9\varepsilon^2 + 9\varepsilon^4 + \varepsilon^6)}{(1 - \varepsilon^2)^3}$	r^6
非点収差	$\sqrt{6} \frac{r^2 \cos(2\phi + \phi_2)}{(1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^4)^{1/2}}$	$r^2 \cos(2\phi + \phi_2)$
三角コマ	$\sqrt{8} \frac{r^3 \cos(3\phi + \phi_3)}{(1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^4 + \varepsilon^6)^{1/2}}$	$r^3 \cos(3\phi + \phi_3)$
二次非点収差	$\sqrt{10} \frac{r^4 \cos(4\phi + \phi_4)}{(1 + \varepsilon^2 + \varepsilon^4 + \varepsilon^6 + \varepsilon^8)^{1/2}}$	$r^4 \cos(4\phi + \phi_4)$

27. SpotOpticsについて

SpotOptics社は1996年に設立されました。光学設計、ソフトウェア解析からエンドユーザー製品に至るまで、光学とソフトウェアの分野で完全なソリューションを提供しています。

我々は、光学設計とソフトウェア解析・開発の分野で約20年の経験があります。当社のソフトウェア専門分野は、画像処理および産業用プロセス制御用のソフトウェアの開発です。

当社の主力製品は、シャックハルトマン原理に基づく波面センサーです。シャックハルトマン波面センサーは、直径数メートルの天体望遠鏡から、直径数ミリのDVDレンズや携帯電話、そして人間の目に至るまで、様々な光学面の光学的品質を測定します。

高度なコンパクト光学設計と高度な自動化により、当社の装置の使用は非常に簡単です。弊社が特別に開発した制御ソフトウェアは、装置の完全な制御を可能にし、弊社のシャックハルトマン分析ソフトウェアは、被検査光学素子の品質について非常に正確な指示を与えます。そして、詳細な診断により、光学品質をどのように改善できるかを提案します。ソフトウェアからの結果はすべて数秒で得られます。

当社の最初のシャックハルトマンセンサーは、天体望遠鏡のミラーのテスト用に開発されました。当社の天文用シャックハルトマン波面センサーPuntinoProは、現在イタリア、スペイン、インド、アメリカのいくつかの望遠鏡で稼働しています。弊社は多くの天文台や企業(ツァイスを含む)の望遠鏡のアライメントと品質管理のコンサルタントをしてきました。そのため、PuntinoProはヨーロッパ、アフリカ、アメリカの望遠鏡にも搭載されています。

Puntinoが天体望遠鏡用に特別に開発されたのに対し、Optino/Opal/Lentinoは実験室や生産環境での光学テスト用に設計・実現されたシャックハルトマン波面センサーで、透過と反射の両方で多種多様な光学素子をテストすることができます。Laserinolはレーザーのテスト用に設計・実現されたセンサーです。紫外から10.6波長(LWIR、CO2)まで、実質的にあらゆる波長のレーザーをテストすることができます。

最後に、私たちは軸上と軸外の両方で光学素子をテストするための一連のセンサーを開発しました。Sferalは携帯電話のレンズのような小さなレンズを、Stellaはテレセントリックレンズのような大きなレンズを、そして5Starはデジタルカメラに取り付けられたズームレンズのような対物レンズをテストすることができます。

当社は、光学アライメント分野と医療分野でさらなる製品を開発しています。

製品の詳細については、<https://kyokko.com/maker/spotoptics/>

電子メールでのお問い合わせは <https://kyokko.com/contact/> まで。

SPOTOPTICS

 日本総代理店
旭光通商株式会社
www.kyokko.com